



新疆某金矿选冶联合工艺研究

杨佐怀, 董越, 郭俊杰, 朱永胜, 陆诗超, 邢建磊

(中国地质调查局乌鲁木齐自然资源综合调查中心, 新疆 乌鲁木齐 830057)

摘要: 新疆某金矿位于北准噶尔成矿带卡拉麦里成矿亚带, 金成矿地质条件优越。其原生矿石由于碳、砷、锑含量较高, 且易泥化, 属较难选矿石。在实验室中原生矿采用制粒浸出, 直接浸出率仅为 16.99%, 但原生矿采用浮选精矿焙烧-氰化工艺, 金总回收率可达 73.14%。本次实验结果表明, 采用选冶联合工艺流程, 可以在合理的成本范围内使该金矿达到较高的选冶指标。

关键词: 金矿; 浮选; 焙烧; 选冶联合工艺

doi:10.3969/j.issn.1000-6532.2022.03.021

中图分类号: TD952 文献标志码: A 文章编号: 1000-6532(2022)03-0121-05

随着金矿资源的大规模开采, 易处理金矿资源日益枯竭, 难处理金矿成为黄金工业生产的主要矿产资源。新疆某金矿位于西伯利亚板块与准噶尔-哈萨克斯坦板块缝合带的卡拉麦里-达尔布特蛇绿岩带东段。通过勘查工作, 在 2 号脉圈定 1 个矿体, 探获推断资源量 7584 kg; 矿石量 2520838 t, 平均金品位 3.01 g/t。在 1 号脉圈定 1 个低品位矿体, 探获推断资源量 1812 kg; 矿石量 726001 t, 平均金品位 2.50 g/t。该金矿主要载金矿物为黄铁矿和毒砂, 矿样泥化严重, 炭含量高达 2.47%, 属于难处理金矿石, 采用常规选冶方法(如重选、浮选、全泥氰化浸出等)难以有效提取矿石中的金元素。鉴于此, 本研究拟采用选冶联合工艺对该难处理金矿石进行实验研究^[1]。

1 地质概况

区域地层属天山内蒙区的准噶尔盆地分区, 裸露地层为晚古生代泥盆系和石炭系, 岩性主要为碎屑岩、火山碎屑岩及火山岩。区内卡拉麦里成矿亚带构造发育, 卡拉麦里深大断裂、清水-苏吉泉大断裂横贯全区。岩浆活动频繁, 从超基性

到中性、酸性、碱性均有出露。区域金矿床(点)沿卡拉麦里深大断裂和清水-苏吉泉大断裂密集成带状分布, 金成矿地质条件优越^[2]。

矿床金矿体厚度约十几米至几十米, 产于下石炭统上亚组构造变形带内的石英脉内, 呈多期多阶段性, 主要硫化物可见黄铁矿、毒砂, 围岩蚀变为硅化、高岭土化、绿泥石化、绢云母化等。总体上, 矿化蚀变具有一定的层控特性, 在千枚岩(原岩富含泥、碳质)中矿化一般较强, 而在凝灰岩、凝灰岩夹凝灰质砂岩中矿化较弱或无矿化。

矿床位于强应变带边缘, 该断裂在本区表现为带内岩石由于构造动力作用发生板岩-千枚岩变质作用; 同时由于热液的强烈活动, 石英脉广泛发育, 并伴随有褐铁矿化、黄铁矿化和孔雀石化等蚀变现象, 形成一规模较大的强片理化破碎蚀变带。

本次研究的金矿脉主要由构造千枚岩、凝灰岩、凝灰岩夹凝灰质砂岩组成, 矿化蚀变限定在构造变形带内, 蚀变矿化组分较简单, 厚度十几米~几十米, 与矿体界线不明显, 黄铁矿、毒砂

收稿日期: 2021-10-14

基金项目: 中国地质调查局“新疆准噶尔盆地-三塘湖盆地重点地区铀矿勘查”项目(DD20211550)

作者简介: 杨佐怀(1986-), 男, 工程师, 主要从事金矿和战略性矿产勘查和研究工作。

通信作者: 董越(1988-), 男, 工程师, 主要从事矿物学、岩石学、矿床学专业的工作。

均呈现多种形态，反应出富含硫化物热液活动的多期性。矿化与构造变形及蚀变强弱关系均较密切：岩石破碎和蚀变作用不强烈，矿化一般较弱，矿石品位则较低，反之一般矿石品位则较高。

2 矿样及其组成

将采集的 800 kg 原生矿样品送至实验室中进行两级鄂式破碎、一级对辊细碎、缩分、混匀和振动筛筛分，-1 mm 筛下部分作为实验矿样和化验分析。

矿样呈灰绿色，主要由灰白色石英、绿泥石、方解石及金属矿物黄铁矿和毒砂等组成。石英为半自形粒状，粒径 0.50~3.00 mm，受构造挤压产生裂纹，沿着被压碎的石英间隙有鳞片状绿泥石，片状白云母和鳞片状绢云母，沿着被压碎的石英裂隙有方解石细脉，方解石细脉粒径 0.05~0.10 mm (图 1)。

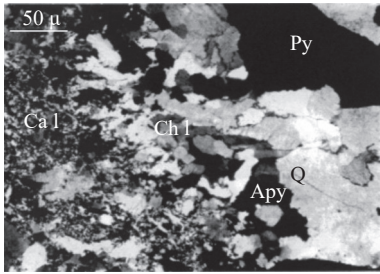


图 1 含金石英矿脉中不等粒的石英、鳞片状的绢云母 (正交偏光, ×25)

Fig.1 Unequal-grained quartz and scaly sericite in gold-bearing quartz veins

金属矿物(黄铁矿和毒砂)呈自形、菱形板条状和他形粒状结构,星点-细脉浸染状分布,黄铁矿交代毒砂,在自形黄铁矿见毒砂残留(图 2)。

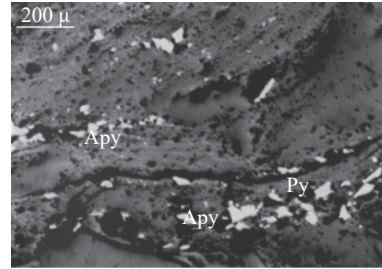


图 2 金属硫化物(黄铁矿和毒砂)呈不均匀浸染状 (单偏光, ×100)

Fig.2 Metal sulfides (pyrite and arsenopyrite) are inhomogeneously disseminated

金矿物主要以显微金(0.2 mm~0.2 μm)和次显微金(<0.2 μm)的形式存在(图 3)。显微金矿物在矿石中形态复杂,分布很不均匀,其分布形式以裂隙金和晶隙金为主,包体金未见。晶隙金分布于粗粒石英、毒砂、黄铁矿晶粒之间,呈微细脉状、棱角状、树枝状、长条状、港湾状分布,其形状受脉石矿物及矿石矿物裂隙限制。裂隙金主要分布于粗粒黄铁矿、石英、毒砂晶隙之间,多呈不规则状。次显微金矿物在黄铁矿、毒砂、石英及一些蚀变矿物中均有分布。

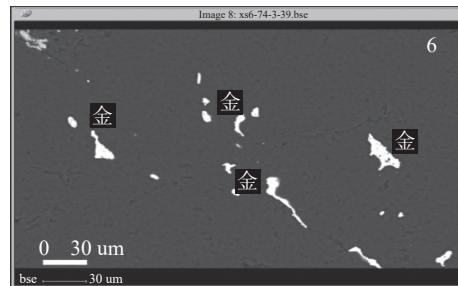


图 3 矿石中金矿物形态

Fig.3 Gold mineral forms in the ore

矿石多元素分析结果见表 1,矿物含量及各粒径组成见表 2。

表 1 原矿多元素分析/%
Table 1 Multi-element analysis of raw ore

Pb	Zn	Au*	Ag*	Fe	C	S	As	Sb	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	CaO
0.15	0.012	3.47	1.97	5.69	2.47	1.03	0.65	0.41	63.33	12.62	2.10	4.52

*单位为g/t。

表 2 矿物含量及各粒径组成

Table 2 Mineral content and composition of each particle size

矿物名称	含量/%	粒度/mm	矿物名称	含量/%	粒度/mm
石英	70.00	0.5~3 0.05~0.3	黄铁矿	1.00	0.03~0.15
绿泥石	20.00	鳞片状	毒砂	2.00	0.01~0.3
白云母-绢云母	2.00	鳞片状	自然金	4粒	0.07~0.02
方解石	5.00	0.05~0.2			

3 实验部分

浮选小试采用吉林探矿设备厂 XFD 3 L、1.5 L 和 0.75 L 挂槽浮选机。丁基黄药、丁铵黑药和 2#油来自湖南明珠选矿药剂有限公司。

3.1 浮选实验

3.1.1 开路探索

开路探索实验（图4）考察了多个浮选工艺参数，包括磨矿细度和碳酸钠、硫酸铜、硅酸钠及捕收剂的用量等实验指标（表3）。

通过上述实验可以看出，磨矿细度选定-0.074 mm 62% 和纯碱、硫酸铜及水玻璃用量分别为 1000 g/t、100 g/t 和 1000 g/t 较为适宜。丁黄和丁铵黑药在粗选 I 的用量为 80 g/t 和 40 g/t，在粗选 II 中的用量为 40 g/t 和 20 g/t。这些优化后的粗选指标应用在带扫选和精选的闭路实验后，整体的药剂制度能满足金富集的需求。

3.1.2 闭路实验

经过一系列开路探索小试后确定其磨矿细度、抑制剂、活化剂、捕收剂、起泡剂用量后，

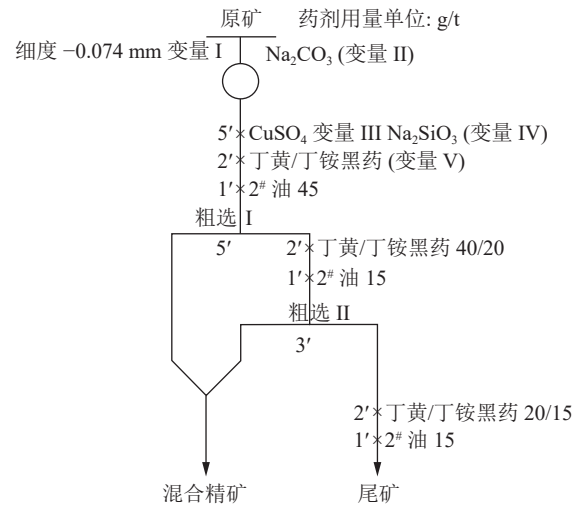


图4 开路实验流程
Fig.4 Open circuit test process

进行了闭路实验（图5），闭路实验采取两粗一精一扫。通过两粗一扫一精，金精矿的品位可以接近 40 g/t，回收率大于 85%。整体的浮选指标能满足金矿开发的要求。闭路实验加权平均指标见表4，浮选精矿多元素分析结果见表5。

表3 开路探索实验指标汇总
Table 3 Summary of open circuit exploration test indicators

变量名称	数值	混精产率/%	混精品位/(g·t ⁻¹)	混精回收率/%
I磨矿细度-0.074 mm/%	52	11.16	23.00	69.83
	62	15.90	18.25	81.01
	72	17.84	16.25	80.11
	82	16.98	16.50	73.88
II 纯碱用量/(g·t ⁻¹)	500	12.44	20.75	70.30
	1000	12.56	23.00	77.90
	2000	12.94	21.25	74.93
III 硫酸铜用量/(g·t ⁻¹)	0	12.56	23.00	77.90
	100	16.80	18.39	86.80
	200	10.76	29.03	83.42
	300	9.20	28.90	83.13
IV 水玻璃用量/(g·t ⁻¹)	0	16.80	18.39	86.80
	500	12.70	25.94	86.98
	1000	11.68	24.50	89.38
丁黄/丁铵黑药/(g·t ⁻¹)	1500	11.66	21.92	79.50
	粗选I 60/30粗选II 40/20	9.70	26.59	75.22
	粗选I 80/40粗选II 40/20	11.68	24.50	89.38
	粗选I 100/50粗选II 40/20	13.72	20.77	83.82
粗选I 120/60粗选II 40/20	13.72	18.57	75.44	

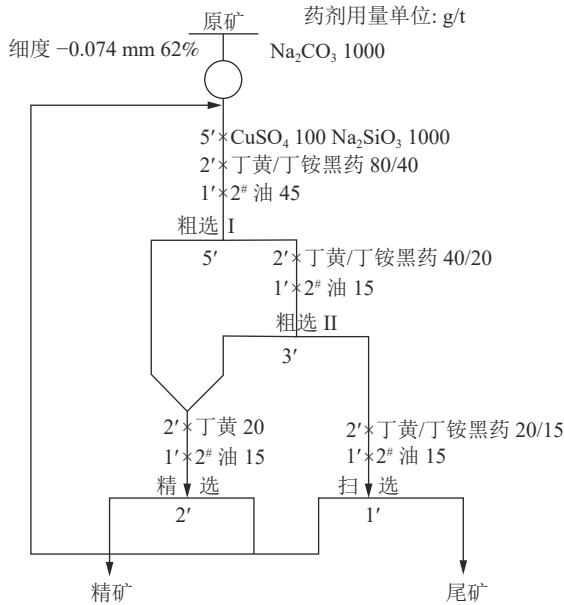


图 5 闭路实验流程
Fig.5 Test flow of closed-circuit

3.2 预焙烧-浸出实验

对于某些难处理金矿，用常规的方法很难将其中的金提取富集，在提金前对其进行预处理是

表 6 浮选精矿焙砂多元素分析结果
Table 6 Multi-element analysis results of flotation concentrate calcine

产物焙砂/g	焙砂化学分析/%					指标/%				
	Au*	S	As	Sb	C	烧失率	脱S率	脱As率	脱Sb率	脱C率
881.50	40.60	1.34	0.98	0.27	1.05	15.98	88.78	87.53	42.55	90.15

*单位为 g/t。

由表 6 可以看出，焙烧效果比较明显。焙烧过程金属平衡表见表 7。

表 7 焙烧过程金属平衡系数计算
Table 7 Calculation of metal balance coefficient during roasting

投料量/g	Au(g·t ⁻¹)	金属量/g	焙砂量/g	Au(g·t ⁻¹)	金属量/g	金属平衡系数/%
1040	35.03	0.03643	881.50	40.60	0.03579	98.24

3.2.1 不同矿浆浓度浸出实验

对不同矿浆浓度进行浸出实验研究，实验条件为 800 mg/L 氰化钠，石灰为 8 kg/t 焙砂，pH 值为 9~10，浸出时间为 24 h，结果见表 8。

表 8 结果表明，33.33% 的矿浆浓度较为适

表 8 不同矿浆浓度浸出实验指标

矿浆浓度/%	浸原品位Au/(g·t ⁻¹)	浸渣品位Au/(g·t ⁻¹)	浸出率/%
33.3340.00	40.6040.60	5.568.30	86.3179.56

表 4 闭路加权平均指标

产品名称	产率/%	品位/(g·t ⁻¹)	回收率/%
精矿	7.15	39.96	86.75
尾矿	92.85	0.47	13.25
原矿	100.00	3.29	100.00

表 5 浮选精矿多元素分析结果/%
Table 5 Multi-element analysis results of flotation concentrate

Cu	Pb	Zn	Au*	Ag*	S	C
0.044	0.030	0.071	35.03	47.77	11.94	10.66
As	Sb	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	CaO	
7.86	0.47	37.17	11.96	1.49	3.97	

*单位为 g/t。

提高此类矿石中金提取率的前提^[3]。采用焙烧法是处理此类难处理金精矿的方法之一^[4-5]。通过焙烧，可使大部分碳和其他易挥发且会影响浸出的金属等在焙烧中随烟气去除，便于冶金浸取。

对金精矿采用马弗炉进行两段焙烧实验：第一段焙烧温度 550℃，时间 90 min；第二段焙烧温度 650℃，时间 90 min，指标见表 6。

这是因为由于泥化现象严重，矿浆浓度不宜过高。

3.2.2 浸出时间实验

对不同浸出时间进行了实验研究，实验条件为 800 mg/L 氰化钠，石灰为 8 kg/t 焙砂，pH 值为 9-10，矿浆浓度为 33.33%，结果见表 9。

由表 9 可以看出，随着浸出时间的延长，浸出率不再增加，浸出时间以 24 小时为较佳条件。

3.3 选冶联合工艺总指标

通过选冶联合工艺后金的总回收率为 73.40%。
金总回收率 (%) = 浮选回收率 × 浸出率 × 焙烧损失的金属平衡系数 = 86.75% × 86.13% × 98.24% = 73.40%。

4 结 论

(1) 新疆某金矿浮选实验通过两粗一精一扫

表9 不同矿浆浓度浸出实验指标

Table 9 Leaching test indexes of different pulp concentrations

时间/h	浸原品位Au/(g·t ⁻¹)	浸渣品位Au/(g·t ⁻¹)	浸出率/%
16	40.60	5.90	85.47
24	40.60	5.63	86.13
32	40.60	6.04	85.12

可以取得较好的回收率（86.75%）和品位接近40 g/t的金精矿。

（2）浮选精矿经过焙烧后，碳质和易挥发金属含量减少，冶金浸出率达到了86.13%。

（3）经过选冶联合工艺处理该矿石，金综合回收率为73.40%，为后续开发该类型金矿提供了良好的数据支撑和技术指导。

参考文献：

- [1] 陈成运. 黄金难选冶矿石预氧化技术研究现状及发展前景[J]. *世界有色金属*, 2020(6):51-52.
CHEN C Y. Research status and development prospects of gold refractory ore pre-oxidation technology[J]. *Non-ferrous Metal of World*, 2020(6):51-52.
- [2] 顾雪祥, 章永梅, 葛战林, 等. 新疆东准噶尔卡拉麦里造山

型金成矿系统与区域构造演化[J]. *地学前缘*, 2020, 27(2):254-275.

GU X X, ZHANG Y M, GE Z L, et al. The orogenic Au mineralization system and regional tectonic evolution in the Kalamaili Area[J]. *Earth Science Frontiers*, 2020, 27(2):254-275.

[3] 田庆华, 王浩, 辛云涛, 等. 难处理金矿预处理方法研究现状[J]. *有色金属科学与工程*, 2017, 8(2):83-89.

TIAN Q H, WANG H, XIN Y T, et al. Research status of pretreatment of refractory gold ore[J]. *Nonferrous Metals Science and Engineering*, 2017, 8(2):83-89.

[4] 邓元良, 明平田, 王广伟, 等. 某金精矿焙烧氧化-氰化尾矿工艺矿物学研究[J]. *矿产综合利用*, 2020(4):121-125.

DENG Y L, MING P T, WANG G W, et al. Research on process mineralogy of roasting oxidation-cyanide tailings of a gold concentrate[J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2020(4):121-125.

[5] 王梅君, 谢洪珍. Solomon 某金矿浸出工艺探索研究[J]. *矿产综合利用*, 2020(2):71-74.

WANG M J, XIE H Z. Study on leaching technology of a gold ore in Solomon[J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2020(2):71-74.

Beneficiation and Metallurgical Process Study for a Gold Mine in Xinjiang

Yang Zuohuai, Dong Yue, Guo Junjie, Zhu Yongsheng, Lu Shichao, Xing Jianlei
(Urumqi Natural Resources Comprehensive Survey Center of
China Geological Survey, Urumqi, Xinjiang, China)

Abstract: The gold deposit in Xinjiang is located in the Kalamaili metallogenetic subzone of the northern Junggar metallogenetic belt, with superior geological conditions for gold mineralization. The primary ore is difficult to separate due to its high carbon, arsenic and antimony contents and easy mudding. In the laboratory experiment, the primary ore is leached by granulation and the direct leaching rate is only 16.99%. However, by adopting flotation concentrate-roasting-cyanidation process, a total gold recovery of 73.14% is achieved. The study results show that the combined beneficiation and metallurgy process can make the gold mine reach a higher beneficiation and metallurgy index at a reasonable cost.

Keywords: Gold Mine; Flotation; Calcination; Combined Process of Beneficiation and Metallurgy